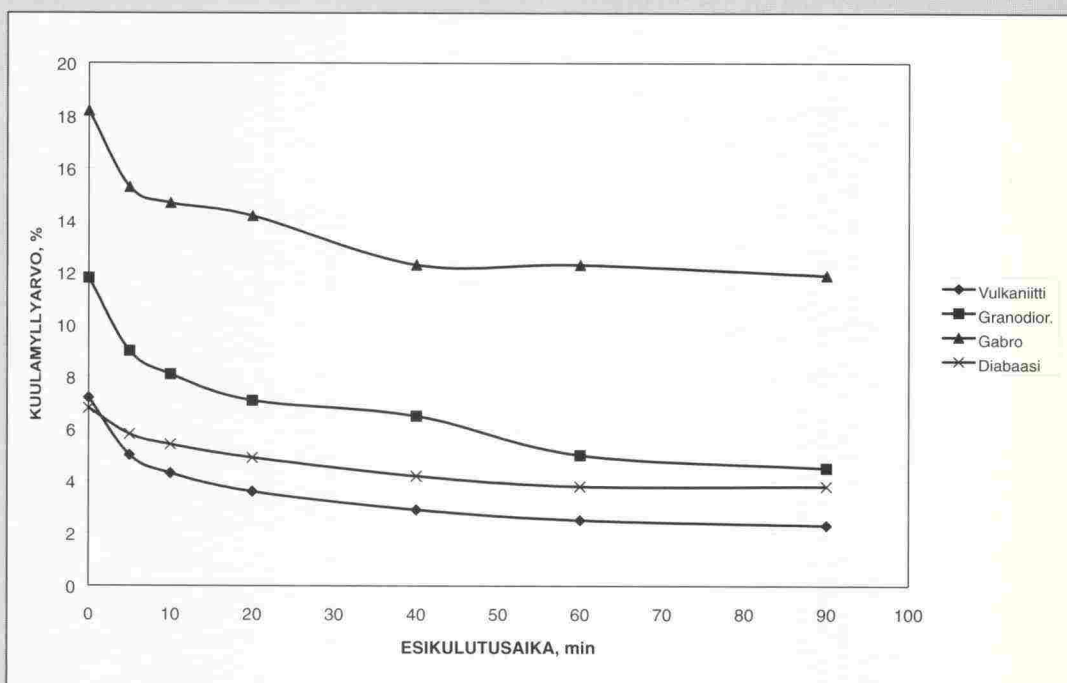




Tielaitos

Kiviaineksen pintakarkeuden vaikutus kuulamylyarvoon



Tielaitoksen
selvityksiä

36/1999

Helsinki 2000

TIEHALLINTO
Tie- ja
liikennetekniikka

Tielaitoksen selvityksiä
36/1999

Kiviaineksen pintakarkeuden vaikutus kuulamyyllyarvoon

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-567-0
TIEL 3200579

Oy Edita Ab
Helsinki 2000

Julkaisua myy
Tielaitos, painotuotepalvelut
Telefax 0204 44 2652
www.tielaitos.fi/kirjasto/tilaus.htm



Tielaitos
TIEHALLINTO
Tie- ja liikennetekniikka
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 44 150

Aiheluokka 33, 42, 56

Asiasanat kuulamylykoe, kiviaines, särmikkyys

TIIVISTELMÄ

Kiviaineksen käyttökelpoisuutta asfalttipäälysteeseen arvioidaan siitä laboratoriomenetelmillä määritettyjen parametrien perusteella. Asfalttinormien ja Tielaitoksen murskaustöiden asiakirjojen uudistamis Pienelläkin esihionnalla oli suuri vaikutus kiviainekseen. En yhteydessä on otettu huomioon uusien EN-standardien tuomat vaatimukset. Kaikki uudet testit ovat tuotetestejä, eli testaus tehdään lopputuotteesta riippumatta siitä, millä tavalla tuote on valmistettu tai käsitelty.

Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena oli selvittää kiviaineksen särmikkyiden ja pintastruktuurin vaikutusta kuulamylyarvoihin ja tutkia voidaanko kuulamylyarvon perusteella luotettavasti ennustaa kiviaineksen kulutuskestävyys kiviaineksen tuotantotavasta riippumatta.

Tutkimus osoitti, että kuulamylytesti SFS-EN 1097-9 on hiovasta luonteestaan johtuen erittäin herkkä ennen kaikkea kiviaineksen särmikkyiden mutta myös pintastruktuurin muutoksille.

Eri tavalla tuotettujen kiviainesten kuulamylyarvojen vertailu on hankalaa, koska kiviaineksen "käsittelyllä" saatua kuulamylyarvon parannusta ei voitu sitoa tarkasti mihinkään kiviainesominaisuuteen, vaan saatu parannus oli mitä suurimmassa määrin kiviainekohtainen.

Täysmittakaavaisella kubisoinnilla tai laboratoriossa tehdyllä esihionnalla Asfalttinormien lujuuden mukainen kiviainesluokka parani noin 70 %:lla kiviaineksista. Suurimmalla osalla parannus oli yksi luokka ja noin 15 %:lla muutos oli kaksi luokkaa. Kahden luokan muutos tapahtui suurimmalla osalla luokasta III luokkaan I.

Esikulutuksen vaikutus oli aivan alussa voimakkainta kaikilla kiviainestyypeillä, mutta happamilla kivillä prosentuaalisesti laskien vaikutus oli lähes kaksinkertainen emäksisiin kiviaineksiin verrattuna.

Kaikkien kiviainesten rakeiden särmikkyiden ja pintastruktuurin muutokset vaikuttavat kuulamylykokeessa saataviin lujuusarvoihin, joita käytetään valintaperusteina kiviainesvalinnassa. Kokeessa tapahtuneiden muutosten suhdetta todelliseen kulutuskestävyyden muutokseen ei tunneta tällä hetkellä riittävästi, jotta eri tavalla tuotettujen kiviainesten kuulamylyarvojen perusteella voitaisiin tehdä aina oikea valinta pitkäaikaisen kulutuskestävyyden kannalta.

Key words Nordic abrasion test, mineral aggregates, angularity

ABSTRACT

The usability of a mineral aggregate in asphalt surface courses is assessed on the basis of parametres calculated by using laboratory methods. The demands brought on by the new EN standards have been taken into consideration during the revision of the Finnish Asphalt Specifications. In all new tests, the testing is carried out on the end product regardless of the way the product has been produced or prepared.

The primary goal of the study was to examine the effect of the angularity and surface structure of a mineral aggregate on the nordic abrasion values and to examine whether the aggregate's wear resistance can be predicted reliably on the basis of the nordic abrasion value no matter what process has been used in the production of the mineral aggregate.

According to the study, nordic abrasion test SFS-EN 1097-9 is, since it involves abrasion, highly susceptible to changes in the angularity, but also the surface structure, of the mineral aggregate.

About 70 % of mineral aggregates experienced an improvement in their mineral aggregate class, which corresponds with the strength level outlined in the Finnish Asphalt Specifications. Most aggregates were improved by one class, while about 15 % experienced an improvement of two classes. Most of the two-class improvements meant a change from class III to class I.

The impact of pre-abrasion was at its greatest for all mineral aggregates right at the beginning, but, as actual percentages go, the impact on acid rocks was almost twice the size of the impact on basic rocks.

Changes in the surface structure and grain angularity of all mineral aggregates affect the abrasion values yielded by the nordic abrasion test and used as a basis for selecting a suitable aggregate. Not enough is known about the relationship between the changes that occurred during testing and the actual change in wear resistance to ensure a correct choice of aggregate on the basis of the nordic abrasion test, as regards long-term wear.

ALKUSANAT

Tulevissa ja osin jo käytössä olevissa eurooppalaisissa standardeissa (EN-standardi) kaikki kiviaineksen testit ovat tuotetestejä eli kiviaineksen ominaisuudet määritetään valmiista tuotteesta. Eurooppalaiset standardit vahvistetaan valmistumisensa myötä myös suomalaisiksi kansallisiksi SFS – EN standardeiksi.

Tutkimuksen tarkoitus oli selvittää kiviaineksen särmikkyiden ja pintastruktuurin vaikutusta kuulamylykokeesta saatavaan kiviaineksen lujuusarvoon ja siten antaa tietoa eri tavalla tuotettujen kiviainesten vertailtavuudesta sekä käyttäytymisestä kuulamylykokeessa.

Tutkimuksen tilaajana oli Tielaitoksen tie- ja liikennetekniikka. Tutkimusta valvoivat Tielaitoksen edustajina diplomi-insinööri Kari Lehtonen, diplomi-insinööri Jorma Heikkilä ja tieinsinööri Mats Reihe. Tutkimuksen vastuuhenkilönä ja raportin laatijana on ollut erikoistutkija Risto Alkio Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) Yhdyskuntatekniikan tutkimusyksiköstä.

Helsingissä tammikuussa 2000

*Tielaitos
Tie- ja liikennetekniikka*

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	TUTKIMUSAINEISTO	8
2.1	Kirjallisuusosa	8
2.2	Laboratoriokokeet	11
3	KOKEIDEN TULOKSET	13
3.1	Kirjallisuusosa	13
3.2	Laboratoriokokeet	15
4	TULOSTEN TARKASTELU	17
4.1	Kirjallisuusosa	17
4.2	Laboratoriokokeet	26
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	30

1 JOHDANTO

Tutkimusmenetelmissä on viime vuosina pyrkimyksenä ollut saattaa tutkimusmenetelmät yhdenmukaisiksi. Tämä juontaa pyrkimyksestä parantaa Euroopan kilpailuasetelmaa muita suuria liittoutumia vastaan. Eräänä edellytyksenä on ollut luoda yhtenäiset standardit ja laadunvalvontajärjestelmät. Euroopan standardointikomitea (Comite Europeen de Normalisation) on ottanut suorittaakseen standardien yhdenmukaistamisen. Kaikki menetelmäkuvaukset julkaistaan CEN-standardina ja saavat numeron EN xxx. Kun eurooppalainen standardi vahvistetaan suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi, se saa muodon SFS-EN xxx.

Kiviaineksen käyttökelpoisuutta arvioidaan siitä laboratoriomenetelmillä määritettyjen parametrien perusteella. Asfalttinormien ja Tielaitoksen murskaustöiden asiakirjojen uudistamisen yhteydessä on otettu huomioon uusien EN-standardien tuomat vaatimukset. Kaikki uudet testit ovat tuotetestejä, eli testaus tehdään lopputuotteesta riippumatta siitä, millä tavalla tuote valmistettu tai käsitelty.

Tulevissa uusissa Asfalttinormeissa 2000 on päällystekiviaineksen lujuuden testaukseen pelkästään vain kuulamylykoe SFS-EN 1097-9. Murskaustöiden asiakirjoissa kuulamylykoe on myös keskeisessä osassa valittaessa kiviaineksia käyttökohteeseen. Tällä hetkellä tieto eri tavalla tuotettujen kiviainesten käyttäytymisestä kuulamylykokeessa on vähäistä ja näin saatujen tulosten vertailtavuus voi esimerkiksi kiviaineksen todelliseen kulutuskestävyyteen nähden olla jopa harhaanjohtava.

Kuulamylykokeessa tulokseen vaikuttaa kiviaineksen mineralogisten seikkojen lisäksi kiviaineksen raemuoto, murskaustapa ja loppukäsittely. Hiovana menetelmänä kuulamylykokeesta saatava tulos on suuresti riippuvainen lujuustekijöiden lisäksi kiviainesrakeiden särmikkyydestä ja pintastruktuurista sekä rikkonaisuudesta.

Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena on selvittää kiviaineksen särmikkyuden ja pintastruktuurin vaikutusta kuulamylyarvoihin ja näin osaltaan tukea sitä tavoitetta, että kuulamylyarvon perusteella voitaisiin luotettavasti ennustaa kiviaineksen kulutuskestävyys tuotantotavasta riippumatta. Kiviainesten monimuotoisuudesta johtuen ko. suhteellisen suppealla tutkimuksella voidaan saada vain käsitys mahdollisen ongelman laajuudesta ja tasosta. Kokonaistavoitteeseen, jossa kuulamylyarvojen perusteella tulisi voida luotettavasti ennustaa päällysteen kuluminen, ei päästä ilman, että tiedetään todellisten tiekulumien ja eri tavalla tuotettujen kiviainesten kuulamylyarvojen välinen yhteys.

2 TUTKIMUSAINEISTO

2.1 Kirjallisuusosa

Kirjallisuusosa koostuu Suomessa tehdyistä aiheeseen liittyvistä selvityksistä. Tutkimusmateriaaleja saatiin lähinnä ASTO-projektin Keravan kiviainekoetien kiviaineksista ja KRP-projektin kiviaineksista. KRP-projekti on katurakenteet ja -päälysteet tutkimusohjelma vuosiksi 1996 - 2001, johon sisältyy yhtenä osana katupäälysteet.

ASTO-projektin Keravan kiviainekoetillä oli kaikkiaan 15 eri kiviainesta, joista voidaan tässä tutkimuksessa hyödyntää kahdeksaa kappaletta, koska ko. materiaaleista on tehty kuulamylykokeet sekä kubisoidusta että kubisoimattomasta materiaalista.

Koetiekiviainekset kubisoitiin muotoarvon vaikutuksen eliminoimiseksi. Täysmittakaavaisen murskausprosessin viimeisenä vaiheena oli keskipakomyly. Kubisoidun kiviaineksen kuulamylykoe tehtiin Ruotsissa VTI:ssa, koska Suomessa ei koetien rakentamisen aikoihin 1989 ollut käytössä kuulamylylaitetta. Osasta kubisoimattomista koetiekiviaineksista on tehty myös kuulamylykoe VTT:ssa. VTI:n kuulamylykoe on tehty menetelmän MBB 59-90 ja VTT:n koe menetelmän TIE 242 mukaan. Menetelmät ovat keskenään identtiset ja niissä käytettävä lajite välpättiin 5,6 mm:n seulalla hyvin huonomuotoisten rakeiden poistamiseksi. Taulukossa 1 on esitetty tutkimuksessa hyödynnetyt kiviainekset ja taulukossa 2 niiden lujuustiedot sekä taulukossa 3 mineraalikoostumus. Tiedot on kerätty ASTO -projektin kiviaineksia koskevista osaraporteista sekä ASTO -projektin loppuraportista.

Taulukko 1. Tutkimuksessa hyödynnetyt ASTO-projektin Keravan kiviainekoetien kiviainekset

NUMERO	KIVILAJI	PAIKKA
1	Hapan vulkaniitti	Saarijärvi
2	Granodioriitti	Tampere (Teisko)
3	Gabro	Kemiö
4	Gabro	Riihimäki
5	Diabaasi	Varpaisjärvi
6	Vihreäkivi	Tornio
7	Peridotiitti	Suomusjärvi
8	Emäksinen vulkaniitti	Siilinjärvi

Taulukko 2. Kiviainesten kuulamyly- ja muotoarvot

Nro	Kivilaji	Paikkakunta	KM-arvo, VTT, norm.	KM-arvo, VTI, kubis.	Suhde VTT/VTI	Liusk B/A, kubis	Puikk C/A, kubis
1	Hapan vulkaniitti	Saarijärvi	5,2	3,3	1,56	1,5	2,0
2	Granodio-riitti	Tampere	11,6	6,2	1,87	1,4	1,9
3	Gabro	Kemiö	13,0	10,8	1,20	1,5	2,0
4	Gabro	Riihimäki	15,4	12,1	1,27	1,5	2,0
5	Diabaasi	Varpaisjärvi	7,6	5,4	1,41	1,5	2,2
6	Vihreäkivi	Tornio	9,8	7,9	1,24	1,5	2,2
7	Peridotiitti	Suomusjärvi	14,2	12,2	1,16	1,5	2,2
8	Emäksinen vulkaniitti	Siilinjärvi	10,3	9,0	1,14	1,5	2,3

Taulukko 3 Kiviainesten mineraalikoostumus

Nro	KV	PL	KM	AM	PY	OL	BI	OP	KA	MAX	SiO ₂
1	34	48	7				7		0,4	5,0	70
2	26	48	17				7		2,5	6,0	70
3		41		43	15				1,5	5,0	46
4		47		30	6		12	6	0,8	10,0	47
5		53		17	26				1,0	5,0	49
6	8	16		71					0,04	0,5	49
7				81		11			0,6	1,0	46
8	15			80					0,05	0,1	49

KV = kvartsi PL = plagioklaasi KM = kalimaasälpä AM = amfiboli PY = pyrokseeni
 OL = oliiviini
 BI = biotiitti OP = opaakki, malmimineraali SiO₂ = SiO₂-pitoisuus, %
 KA = mineraalien keskimääräinen raekoko, mm Max=mineraalien keskimäär.
 raekoko, mm

Katurakenteet- ja päällysteet tutkimusohjelmassa vuoden 1996 tutkimuksissa oli yhdeksän mineralogisesti ja rakenteellisesti sekä lujuusominaisuuksiltaan erityyppistä kiveä. Vuoden 1997 tutkimuksissa tutkittiin muotoarvoltaan kahta erilaista kiviainesta eli muotoluokaltaan hyvää ja huonoa kiviainesta. Muototutkimuksessa oli kuusi erilaista kiviainesta sekä referenssikivi vuoden 1996 kiviaineksiin. Näitä molempien vuosien kiviainestuloksia voidaan hyö-

dyntää tässä selvityksessä. Tiedot on kerätty KRP-tutkimusohjelman raportista "Katupäälylystetutkimukset 1997".

Kuulamylyllyarvot on tehty menetelmän SFS-EN 1097-9 mukaisesti tuotetestinä ja modifioituna saman menetelmän mukaisesti kuitenkin niin, että kiviaineksia on esikulutettu kuulamylyllyrummussa 30 minuuttia. Kiviainesten litteysluku on määritetty menetelmän SFS-EN 933-3 mukaisesti lajitteesta 8-16 mm. Soramurskeiden murtopintaluvut on määritetty menetelmän SFS-EN 933-5 mukaisesti. Taulukossa 4 on esitetty hyödynnetyt kiviainekset ja niiden kuulamylyllyarvot sekä litteysluvut. Taulukossa 5 on esitetty kiviainesten mineraalikoostumukset ja likimääräiset SiO_2 -määrät laskettuna kvartsin ja maasälpien määränä.

Taulukko 4. KRP-projektista valitut kiviainekset sekä niiden lujuus- ja muototulokset

Numero 1-9 =1996 10-22=1997	Kivilaji	KM, % normaali	KM, % esikulutettu 30 min.	KM-suhde normaali / esikulutettu	Litteys- luku, %
1	Amfiboliitti	18,2	13,2	1,38	11,5
2	Tonaliitti	16,5	9,9	1,67	10,4
3	Plagioklaasiporfyyriitti	5,0	3,2	1,56	9,5
4	Graniitti	12,4	7,6	1,63	9,5
5	Teräskuona	9,7	7,5	1,29	3,4
6	Epähom. soramurske	11,7	7,3	1,60	8,7
7	Granodioriitti	9,4	7,2	1,31	12,9
8	Epähom. soramurske	9,4	6,0	1,57	7,1
9	Graniitti	10,1	5,8	1,74	13,1
10	Kiilleliuske (1), hyvä	7,4	6,0	1,23	4,8
11	Kiilleliuske (1), huono	7,7	6,0	1,28	24,0
12	Granod.gneissi, hyvä	9,4	6,9	1,36	4,9
13	Granod.gneissi, huono	10,8	5,9	1,83	18,5
14	Gabro, hyvä	13,0	10,4	1,25	4,5
15	Gabro, huono	13,5	10,4	1,30	20,2
16	Kiilleliuske (2), hyvä	17,5	14,0	1,25	2,9
17	Kiilleliuske (2), huono	18,2	13,0	1,40	16,1
18	Emäks.vulkaniitti, hyvä	6,7	4,4	1,52	6,4
19	Emäks.vulkan, huono	6,4	4,6	1,39	17,2
20	Teräskuona, hyvä	9,8	6,5	1,51	4,9
21	Teräskuona, huono	11,1	7,7	1,44	5,8
22	Granodioriitti	12,8	7,7	1,66	15,2

Taulukko 5. KRP-projektin kiviainesten mineraalikoostumus (%)

NRO	KV	PL	KM	AM	BI	PY	OP	SiO ₂	KA
1	+	40		50	+	+	3	60	< 1
2	25	60	+		15			75	< 4
3	60			37			3	60	< 0,1 [#]
4	20	40	20	8	10		+	80	< 10
7	20	35	35	2	8			90	< 8
9	35	30	25		+		+	90	< 2
10/11	50				45		+	50	< 0,1
12/13	20	40	15	10	10		+	75	< 3
14/15		50		22	6	18	3	50	< 4
16/17	55			+	38		+	55	< 0,5 [#]
18/19		44		25		28	+	44	< 1

KV = kvartsi PL = plagioklaasi KM = kalimaasälpä M = amfiboli

BI = biotiitti PY = pyrokseeni OP = opaakki, malmimineraali

KA = mineraalien keskimääräinen raekoko, mm kiven hajarakeita

[#] = ei sisällä porfyyrinen

Soramurskeiden murtopintaluvut olivat soramurskeella 6: 42 / 19 / 13 / 26 ja soramurskeella 8: 42 / 29 / 22 / 7 (täysin murskautuneet / murskautuneet / pyöristyneet / täysin pyöristyneet). Teräskuonasta ei määritetty mineralogisia ominaisuuksia.

2.2 Laboratoriokokeet

Laboratoriokokeeseen valittiin lujuudeltaan ja mineralogiselta koostumukseltaan neljä erilaista kiviainesta siten, että oli kulutusominaisuuksiltaan hyvä ja keskinkertainen sekä tumma, emäksinen että vaalea, hapan kiviaines. Tummiksi kiviaineksiksi valittiin Riihimäen gabro (3) ja Varpaisjärven diabaasi (4), joiden SiO₂-pitoisuudet ovat 47 ja 49 %. Vaaleiksi kiviaineksiksi valittiin Saarijärven hapan vulkaniitti (1) ja Tampereen granodioriitti (2), joiden SiO₂-pitoisuus oli molemmilla 70 %. Kiviainekset esiintyvät kuvissa numeroidun mukaisesti.

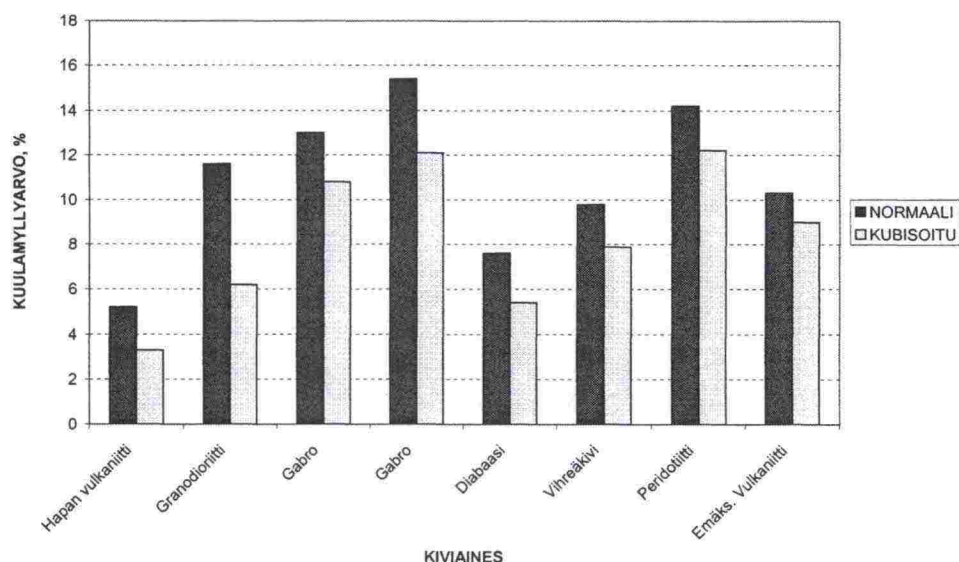
Materiaaleilla selvitettiin sekä lyhytkestoisen, särmiä pyöristävän esikulutuksen että pitempikestoisten, myös pintastruktuuria hiovan esikulutuksen vaikutusta kiviainesten kuulamylyarvoon. Esikulutussajoiksi valittiin 5, 10, 20, 40, 60 ja 90 minuuttia. Esikulutetuista materiaaleista tehtiin kuulamylykoe menetelmän SFS-EN 1097-9 mukaisesti kuten myös esikuluttamattomasta materiaalista.

Kiviaineksen kaikki testinäytteet on valmistettu samasta kivierästä tasalaa-
tuisuuden varmistamiseksi. Esikulutettava materiaali oli rakeisuudeltaan
11,2 – 18 mm eli maksimiraekooltaan suurempaa kuin varsinainen testi-
näyte 11,2 – 16 mm ja näytemäärä oli 2kg. Näin varmistettiin näytteen
rakeisuuden oikeellisuus, kun esikulutetusta materiaalista seulottiin
menetelmän mukainen testinäyte.

3 KOKEIDEN TULOKSET

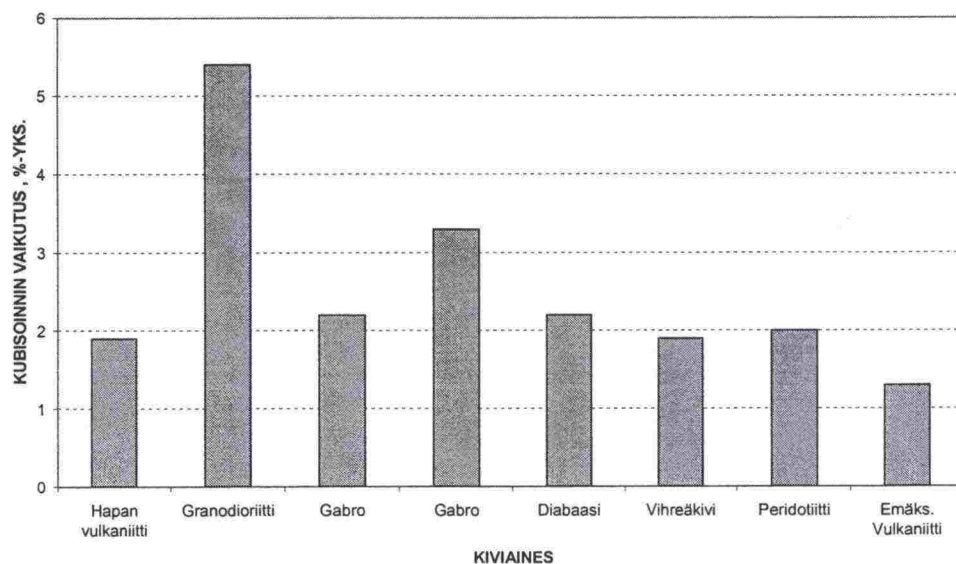
3.1 Kirjallisuusosa

ASTO-projektin Keravan koetien kubisoitujen ja käsittelemättömien kiviainesten kuulamylyarvot on esitetty lukuarvoina taulukossa 2 sekä kuvissa 1–2. Kuvassa 1 on esitetty kubisoidun koetiekiviainesten kuulamylyarvot (VTI) ja normaalimurskauksen tuotteista (välppäys 5,6 mm:n seulalla) tehdyt kuulamylyarvot.



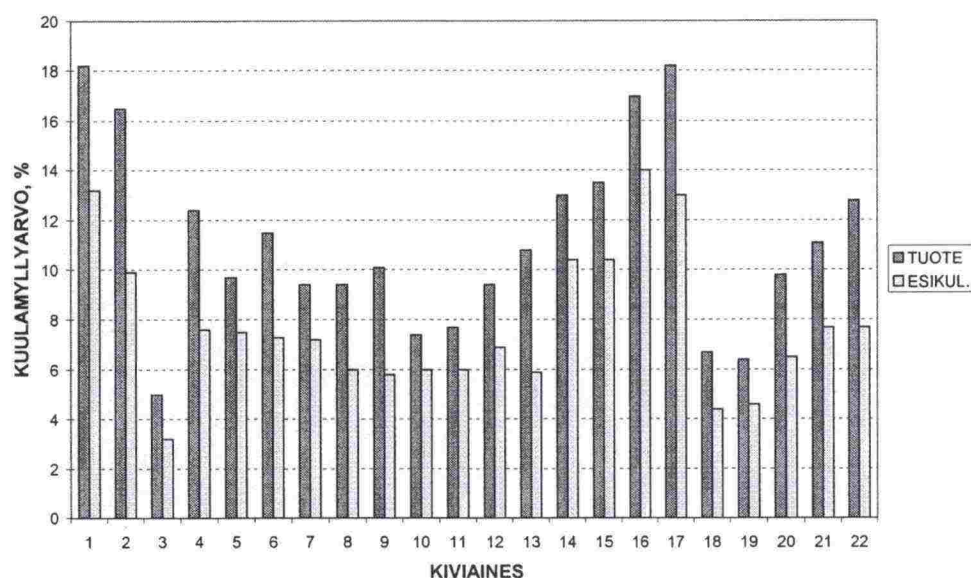
Kuva 1. ASTO-kiviainekoetien (Kerava) materiaalien kuulamylyarvot.

Kuulamylyarvot olivat kubisoiduilla kiviaineksilla välillä 3,3 – 12,2 % keskiarvon ollessa 8,4 %. Vastaavat arvot normaalimurskauksen tuotteella olivat 5,2 – 15,4 % ja 10,9 %. Kuvassa 2 on esitetty kuinka monta %-yksikköä kubisointi on parantanut kuulamylyarvoja. Kuulamylyarvot ovat parantuneet keskimäärin 2,5 %-yksikköä vaihteluvälin ollessa 1,3 – 5,4 %-yksikköä.



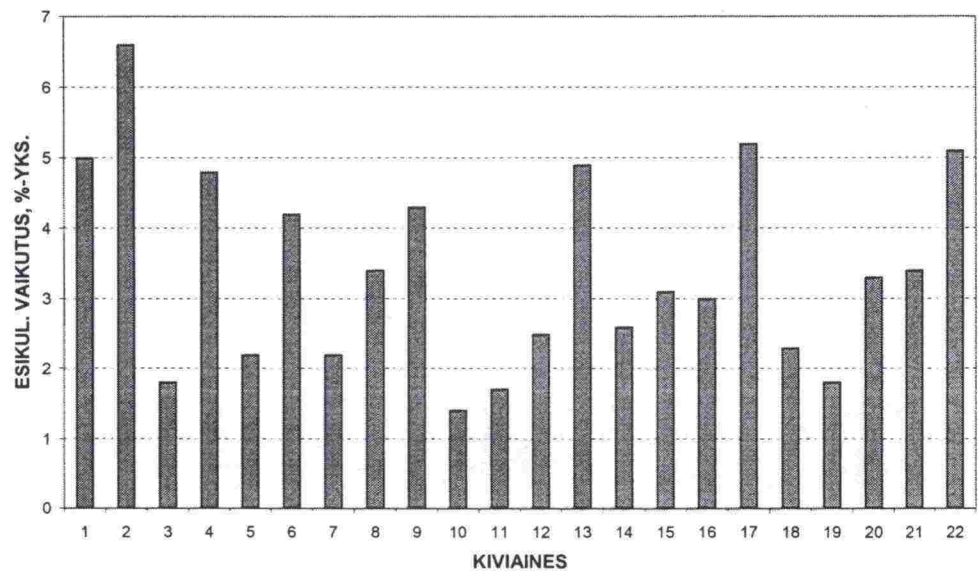
Kuva 2. Kubisoinnin kuulamylyarvoja parantava vaikutus.

KRP-projektin kiviainesten kuulamylytulokset on esitetty taulukossa 4 ja kuvissa 3 – 4. Kuvassa 3 on esitetty tuotetestin mukaiset kuulamylyarvot sekä kuulamylyarvot 30 minuutin esikulutuksen jälkeen.



Kuva 3. KRP-projektin kiviainesten kuulamylyarvot tuotetestinä ja esikulutetusta materiaalista.

Tähän ryhmään kuuluvista kiviaineksista numerot 1-9 ovat vuoden 1996 tutkimuksista ja kiviainekset 10 – 22 vuoden 1997 tutkimuksista, jossa kivet 10 – 21 ovat pareittain hyvä- ja huonomuotoisina. Kiviainesten kuulamylyarvot tuotetestinä olivat välillä 5,0 – 18,2 % keskiarvon ollessa 11,2 %. Esikulutettujen kiviainesten kuulamylyarvot olivat välillä 3,2 – 13,2 % ja keskiarvo oli 7,8 %. Kuvassa 4 on esitetty esikulutuksen vaikutus kuulamylyarvoihin %-yksikköinä laskien.



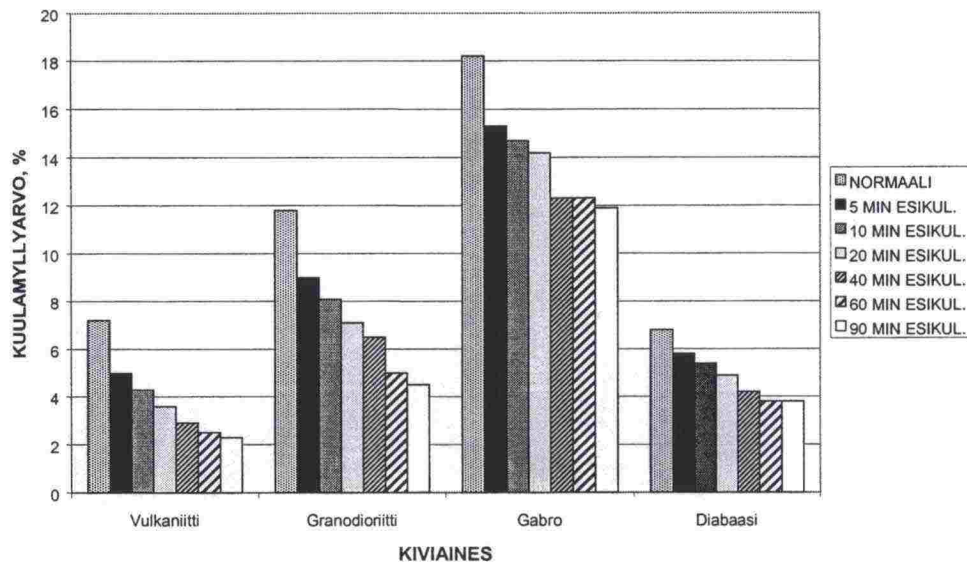
Kuva 4. Esikulutuksen kuulamylyllyarvoja parantava vaikutus.

3.2 Laboratoriokokeet

Laboratoriokokeisiin valittujen kiviainesten tulokset on esitetty lukuarvoina taulukossa 6 sekä kuvassa 5.

Taulukko 6. Kiviainesten kuulamylyllyarvot (%) ja litteysluku (%).

N:o	Kivilaji	Tuote- testi	Esikul. 5 min	Esikul. 10 min	Esikul. 20 min	Esikul. 40 min	Esikul. 60 min	Esikul. 90 min	Litteys
1	Vulkaniitti	7,1	5,0	4,3	3,6	2,9	2,5	2,3	22,4
2	Gran.dior.	11,8	9,0	8,1	7,1	6,5	5,0	4,5	15,0
3	Gabro	18,2	15,3	14,7	14,2	12,3	12,3	11,9	19,6
4	Diabaasi	6,8	5,8	5,4	4,9	4,2	3,8	3,8	12,0



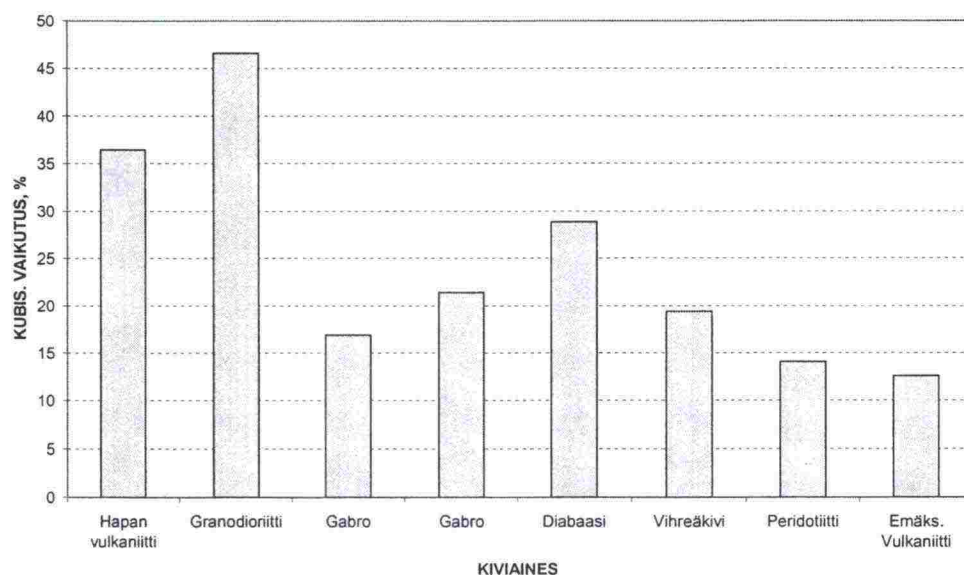
Kuva 5. Kuulamylykokeiden tulokset

Kiviainesten esikulutuksella oli myös näillä materiaaleilla kuulamylyarvoa loogisesti parantava vaikutus. Ensimmäisen esikulutuksen (5 min) vaikutus oli selvästi suurin vulkaniitilla, granodioriitillä ja gabrolla, kun taas diabaasilla arvon paraneminen oli tasaista esikulutusten suhteen. Kuulamylyarvo parani esikulutuksissa vulkaniitilla 4,8 %-yksikköä, granodioriitillä 7,3 %-yksikköä, gabrolla 6,3 %-yksikköä ja diabaasilla 3,0 %-yksikköä.

4 TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Kirjallisuusosa

ASTO-projektin koetien kiviaineksilla kubitsoinnin vaikutus oli selvästi kuulamyllyarvoa parantava. Tuloksia tarkasteltaessa tulee huomioida se, että rinnakkasnäytteitä on tehty vain yksi kappale ja erilaisia kiviaineksia oli vain 8 kappaletta. Tämä aiheuttaa osaltaan tiettyä epävarmuutta tulosten tarkasteluun. Lukuarvoista laskettuna parannus oli välillä 1,3 – 5,4 %-yksikköä keskiarvon ollessa 2,5 %-yksikköä (kuva 2). Kuvassa 6 on esitetty kubitsoinnin kuulamyllyarvoa ko kiviaineksilla parantava vaikutus prosentteina. Arvot paranivat välillä 12,6 – 46,6 % keskiarvon ollessa 24,6 %. Suurimmat prosentuaaliset muutokset olivat vaaleilla kiviaineksilla (hapan vulkaniitti ja granodioriitti). Vastaavasti suurin lukuarvomuutos oli granodioriitilla (5,4 %-yks.) ja toiseksi suurin gabrolla (3,3 %-yks.).



Kuva 6. Kubitsoinnin kiviaineksen kuulamyllyarvoa parantava vaikutus prosentteina kiviaineksen tuotetestin arvosta.

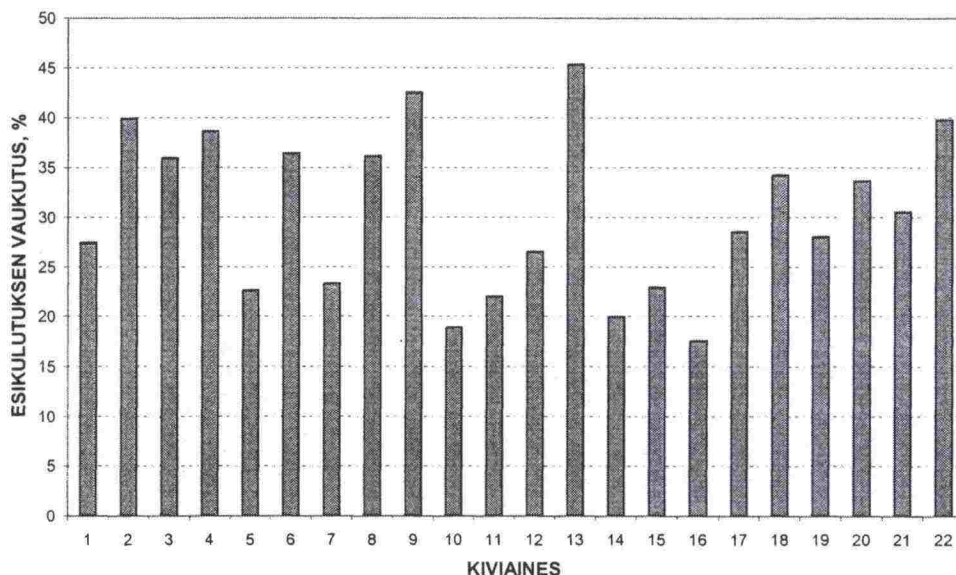
Kubitsoinnin vaikutus Asfalttinormien 1995 mukaiseen kiviainesluokkajakoon kuulamyllyarvon perusteella on esitetty taulukossa 7. Tulosten mukaan luokka on muuttunut viidellä näytteellä siten, että neljällä näytteellä muutos oli yksi luokka (gabro, diabaasi, peridotiitti ja vulkaniitti) ja yhdellä näytteellä kaksi luokkaa (granodioriitti). Kolmella näytteellä luokka pysyi samana (hapan vulkaniitti, gabro ja vihreäkivi).

Kiviaineksen valintaan ja kiviainesten keskinäiseen vertailtavuuteen lujuusarvon ja -luokan muuttuminen murskaustavan vaikutuksesta luo epävarman olosuhteen, koska ei vielä tunneta riittävästi kiviainesrakeen muodon ja särmikkyuden vaikutusta kulumiskestävyyteen ja ennen kaikkea näin saadun kuulamyllyarvon ja kulumiskestävyyden suhdetta erilailla tuotetuilla kiviaineksilla.

KRP-projektin kiviaineksille tehdyn esikulutuksen vaikutus oli myös arvoja parantava. Kuvassa 4 on esitetty vaikutus lukuarvoina ja kuvassa 7 vaikutus on esitetty prosentteina. Lukuarvoina esitettynä arvojen parannus oli välillä 1,4 – 6,6 %-yksikköä keskiarvon ollessa 3,4 %-yksikköä. Vastaavasti prosentteina laskien muutos oli välillä 17,6 – 45,4 % keskiarvon ollessa 30,0 %.

Taulukko 7. Asfalttinormien 1995 mukaiset lujuusluokat kuulamylykokeen perusteella ja luokkamuutoksen suuruus

NRO	KIVILAJI	LUJUUS- LUOKKA NORM. KM	LUJUUS- LUOKKA KUBIS. KM	LUOKKA- MUUTOS
1	Vulkaniitti	I	I	0
2	Granodioriitti	III	I	2
3	Gabro	II	II	0
4	Gabro	III	II	1
5	Diabaasi	II	I	1
6	Vihreäkivi	II	II	0
7	Peridotiitti	III	II	1
8	Vulkaniitti	II	I	1



Kuva 7. Esikulutuksen vaikutus kuulamylyllyarvoihin prosentteina

Kiviainekset sijoittuivat Asfalttinormien 1995 mukaisiin luokkiin taulukon 8 mukaisesti, jossa on esitetty tuotetestinä ja esikulutuksen jälkeen tehdyissä kokeissa saadut luokat sekä luokkamuutoksen suuruus. Tulosten mukaan 15:sta näytteellä (68,2 %) luokkaraja parani ja seitsemällä pysyi samana. Kolmella näytteellä (13,6 %) parannus oli kaksi luokkaa ja muilla yksi luokka.

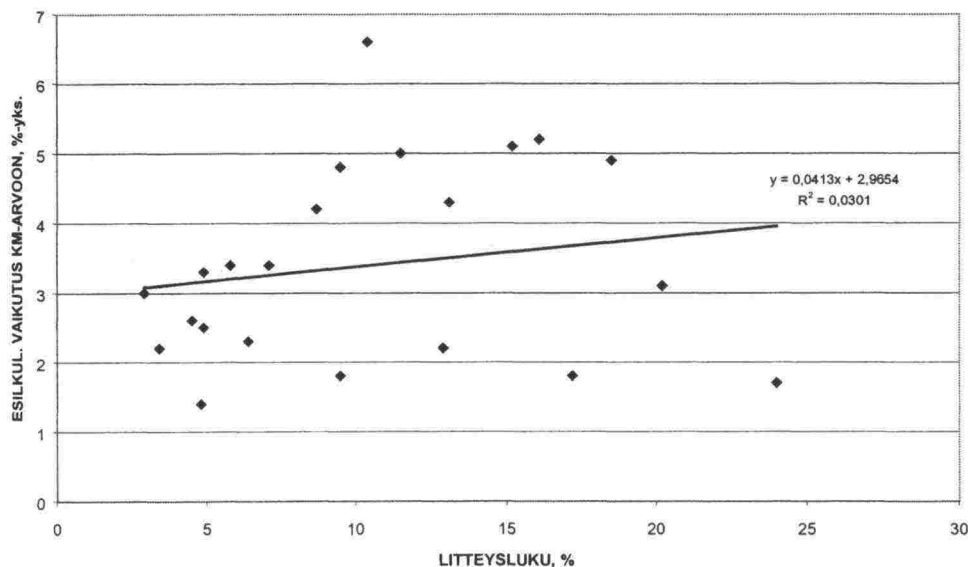
Kahden luokkarajan muutosta on pidettävä erittäin merkittävänä ajatellen kiviaineksen ennustettavuutta kulutuskestävyyden kannalta päällysteessä. Yhden luokkarajan muutos kuulamylykokeessa tapahtuu helposti kiviainek-

sen särmien vähänkin pyöristyessä. Syynä tähän on kokeen hiova kulutus ja täten kiviaineksen kuluminen on suurinta kokeen alussa.

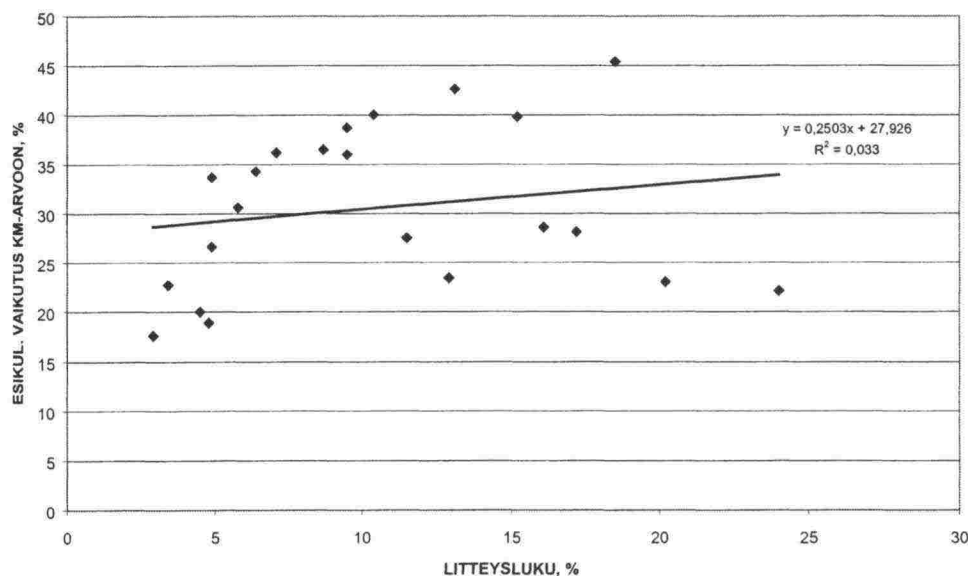
Taulukko 8. Asfalttinormien 1995 mukaiset lujuusluokat kuulamylykokeiden perusteella ja luokkamuutoksen suuruus

NUMERO 1-9 =1996 10-22=1997	KIVILAJI	LUJUUS- LUOKKA , NORMAALI KM	LUJUUS- LUOKKA , ESIKULUT. KM	LUOKKA- MUUTOS
1	Amfiboliitti	IV	III	1
2	Tonaliitti	IV	II	2
3	Plagioklaasiporfyyriitti	I	I	0
4	Graniitti	III	II	1
5	Teräskuona	II	II	0
6	Epähomog. soramurske	III	II	1
7	Granodioriitti	II	II	0
8	Epähomog. soramurske	II	I	1
9	Graniitti	III	I	2
10	Kiilleliuske (1), hyvä	II	I	1
11	Kiilleliuske (1), huono	II	I	1
12	Granod.gneissi, hyvä	II	I	1
13	Granod.gneissi, huono	III	I	2
14	Gabro, hyvä	III	III	0
15	Gabro, huono	III	III	0
16	Kiilleliuske (2), hyvä	IV	III	1
17	Kiilleliuske (2), huono	IV	III	1
18	Emäks.vulkaniitti, hyvä	I	I	0
19	Emäks.vulkan, huono	I	I	0
20	Teräskuona, hyvä	II	I	1
21	Teräskuona, huono	III	II	1
22	Granodioriitti	III	II	1

Tarkasteltaessa KRP-aineistolla pelkästään rakeen muodon vaikutusta kuulamylyllyarvon muutokseen (tuotetesti / esikulutettu näyte) ei niillä havaita olevan korrelaatiota keskenään. Muotoarvo ei luonnollisestikaan itsessään kerro kiviaineksen käyttäytymisestä kuulamylykokeessa kovinkaan paljon, vaan kiviaineksen kulutuskestävyys riippuu ennen kaikkea mineralogisista tekijöistä. Mineralogiset tekijät kuitenkin vaikuttavat kiviainesmurskauksessa syntyvään raemuotoon, joten tätä kautta raemuoto/lujuus vaikuttaa tuloksiin. Kuvassa 8 on esitetty litteysluvun ja kuulamylyllyluvun muutoksen (%-yksikköinä) välinen korrelaatio ja kuvassa 9 sama korrelaatio, mutta muutos prosentteina ilmaistuna.



Kuva 8. Litteysluvun ja kuulamylyarvomuutoksen (tuotetestin / esikulutettu näyte) välinen korrelaatio

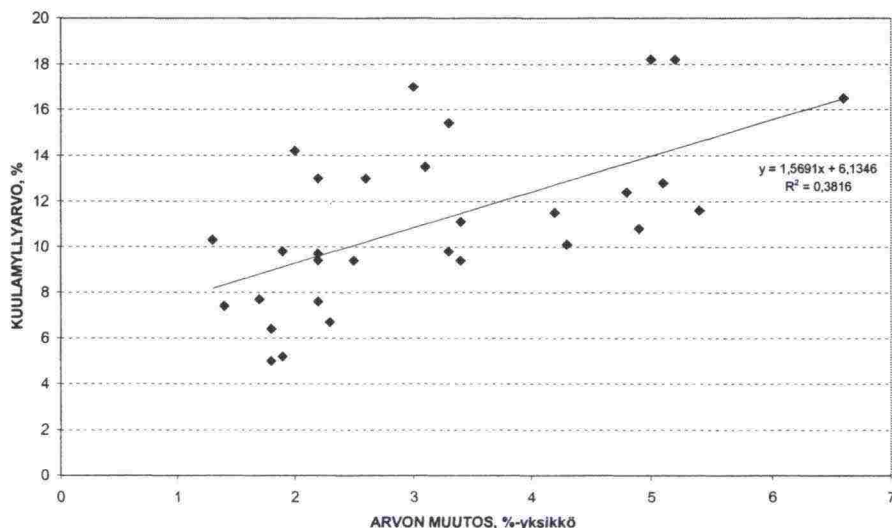


Kuva 9. Litteysluvun ja kuulamylyarvomuutoksen (tuotetestin / esikulutettu näyte) välinen korrelaatio.

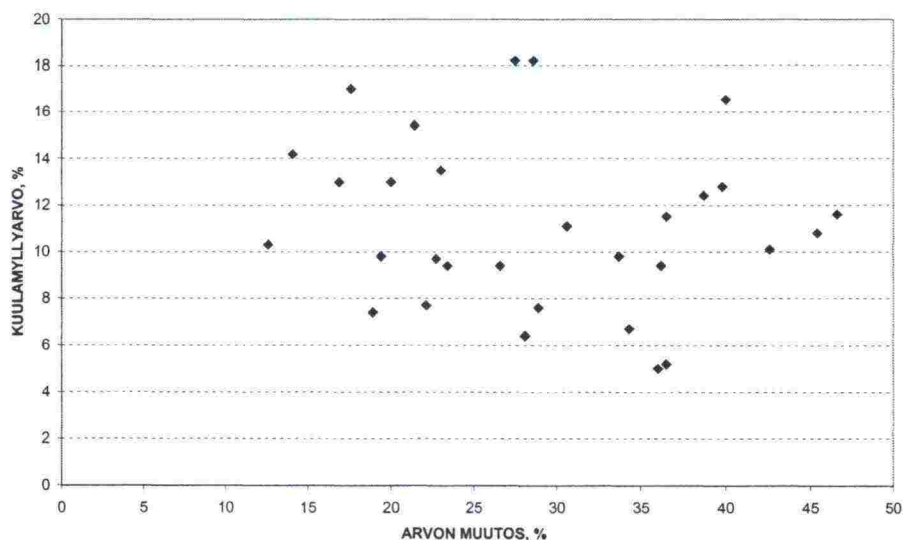
Tulosten mukaan suuruusluokaltaan 5 %:n litteysarvon kiviaineksilla kuulamylyarvon muutokset olivat noin 1,5 – 3,5 %-yksikköä, 10 %:n litteysarvon kiviaineksilla noin 2 – 6,5 %-yksikköä ja > 15 %:n arvolla noin 2 – 5 %-yksikkö. Muutos prosentteina ilmaistuna oli 5%:n litteysarvoilla prosenttiarvojen 17 – 34 välissä, 10 %:n litteysarvoilla prosenttiarvojen 24 – 40 välissä sekä > 15 %:n litteysarvoilla prosenttiarvojen 22 – 45 välissä.

Tarkasteltaessa koko aineistossa esikulutuksen tai kubisoinnin vaikutusta kuulamylyarvoon on sillä tietysti korrelaatio saatujen arvoparannusten kanssa. Korrelaatio ei kuitenkaan ole kovin hyvä ($r = 0,618$).

Kuvassa 10 on esitetty esikäsittelmättömän materiaalin kuulamylyarvon ja käsittelyllä saadun arvon parannuksen välinen korrelaatio. Kuvassa 11 on esitetty sama korrelaatio mutta parannus prosentteina laskien.



Kuva 10. Kiviaineksen kuulamylyarvon ja esikäsittelyllä saadun parannuksen (%-yksikkö) välinen korrelaatio (ASTO + KRP).

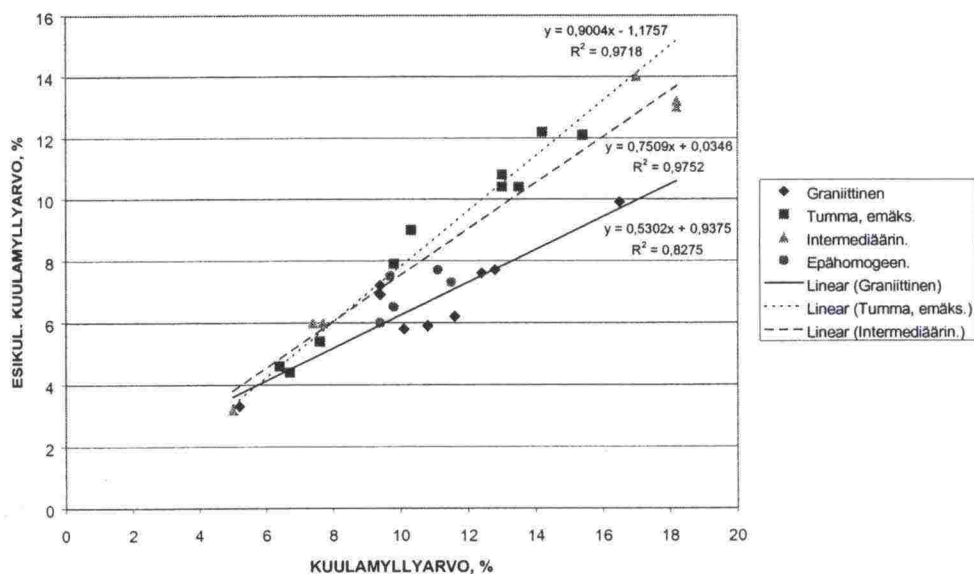


Kuva 11. Kiviaineksen kuulamylyarvon ja kiviaineksen esikäsittelyllä saadun parannuksen (%) välinen korrelaatio (ASTO + KRP).

Lujuuden vaikutus kuulamylyarvon muutoksiin oli I-luokan kiviaineksella $< 2,5$ %-yksikköä, II-luokan kiviaineksella muutos oli $1,5 - 4,5$ %-yksikköä ja III-luokan kiviaineksella $1,5 - 5,5$ %-yksikköä sekä IV-luokan kiviaineksella $2 - 6,5$ %-yksikköä. Vastaavat arvot prosentteina ilmaistuna olivat prosenttiarvojen $25 - 35$, $20 - 35$, $10 - 45$ ja $15 - 40$ välissä. Näiden tulosten mukaan kiviaineksesta tehtyjen erilaisten tuotteiden kuulamylyarvot ovat

aika huonosti ennustettavissa. Sama tietysti koskee myös eri kiviainesten vertailtavuutta, vaikka ns. normaalin kiviaineksen ja käsitellyn kiviaineksen kuulamylyarvojen välinen korrelaatio on hyvä (koko aineksella $R^2 = 0,857$) joh-tuen siitä, että kokeissa mitataan kuitenkin samaa kiviainesominaisuutta.

Kuvassa 12 on esitetty erityyppisillä kiviaineksilla saadut korrelaatiot. Graniittisilla, happamilla kiviaineksilla esikulutuksen vaikutus oli kaikkein voimakkainta ja korrelaatiossa R^2 oli 0,828. Vastaavasti tummilla, emäksisillä kiviaineksilla esikulutuksen vaikutus oli pienin johtuen tummien kiviainesten sisältämistä pehmeistä mineraaleista ja kuulamylykokeen hiovasta luonteesta ($R^2 = 0,972$) Graniittisillä kiviaineksilla on luonteenomaista alkukulu-tuksessa tapahtuva terävien särmien lohkeamalla tapahtuva pyöristymisen.



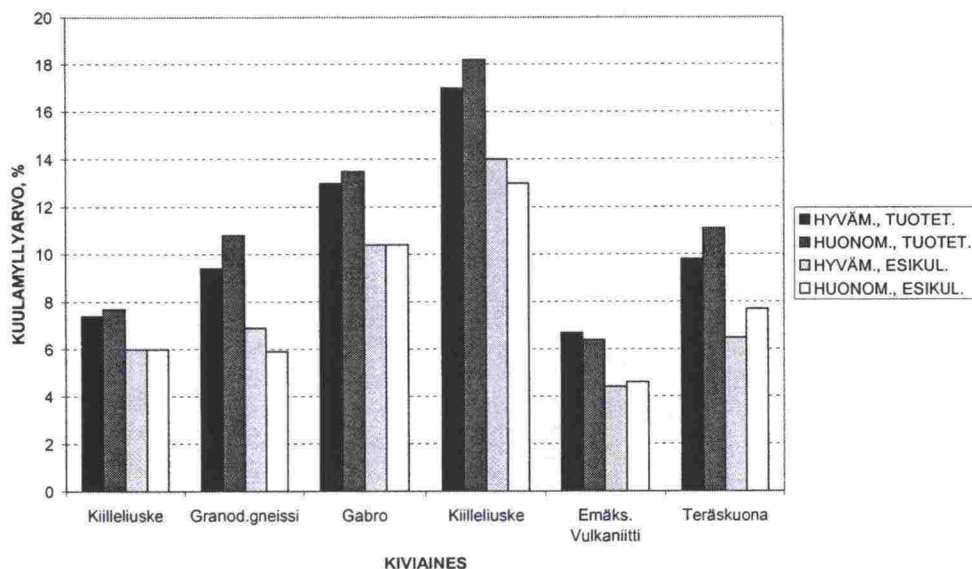
Kuva 12. Käsittelemättömien ja käsiteltyjen kiviainesten kuulamylyarvojen välinen korrelaatio.

KRP-projektissa selvitettiin myös raemuodon vaikutusta päällystemassan suhteitukseen ja kulutuskestävyyteen. Kuudella kiviaineksella tehtiin kaksi muodoltaan erilaista kiviainesta. Toinen kiviaines pyrittiin tekemään litteys-arvoltaan 5 % ja toinen 20 %. Viidellä kiviaineksella hyvämuotoinen kiviaines oli litteysarvoltaan välillä 2,9 – 6,4 % ja huonomuotoinen välillä 16,1 – 24,0. Teräkuona murskautuu luonnostaan erittäin hyvämuotoiseksi, joten siitä ei saatu muihin verrattuna riittävän huonomuotoista vaan arvoiksi saatiin 4,9 % ja 5,8 %.

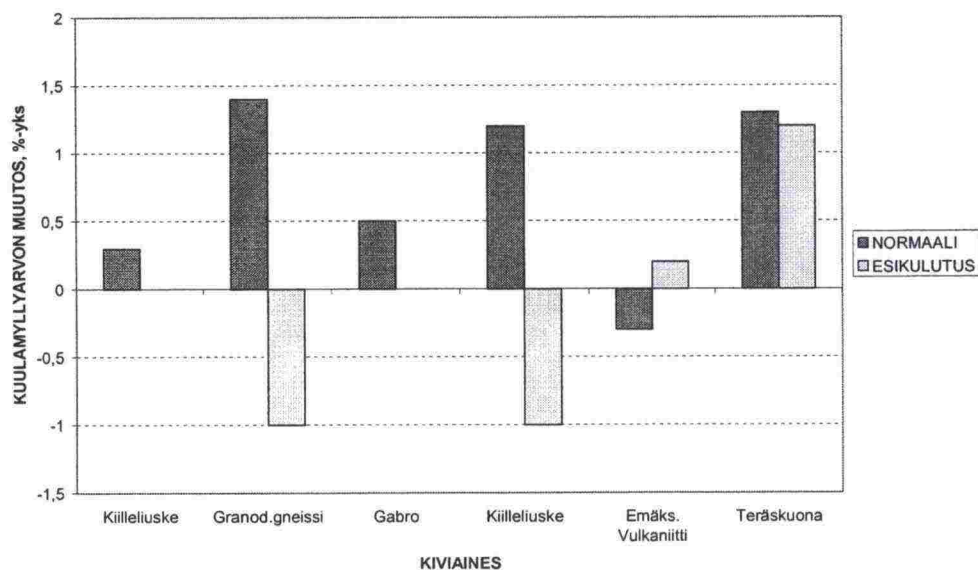
Muotoarvotarkastelussa yhteys taulukoiden 4 ja 8 numerointeihin on seuraava (uusi numero / taulukoiden 4 ja 8 numerointi):

kiilleliuske (1)	1 / 10 - 11
granodioriittigneissi	2 / 12 - 13
gabro	3 / 14 - 15
kiilleliuske (2)	4 / 16 - 17
emäksinen vulkaniitti	5 / 18 - 19
teräskuona	6 / 20 - 21

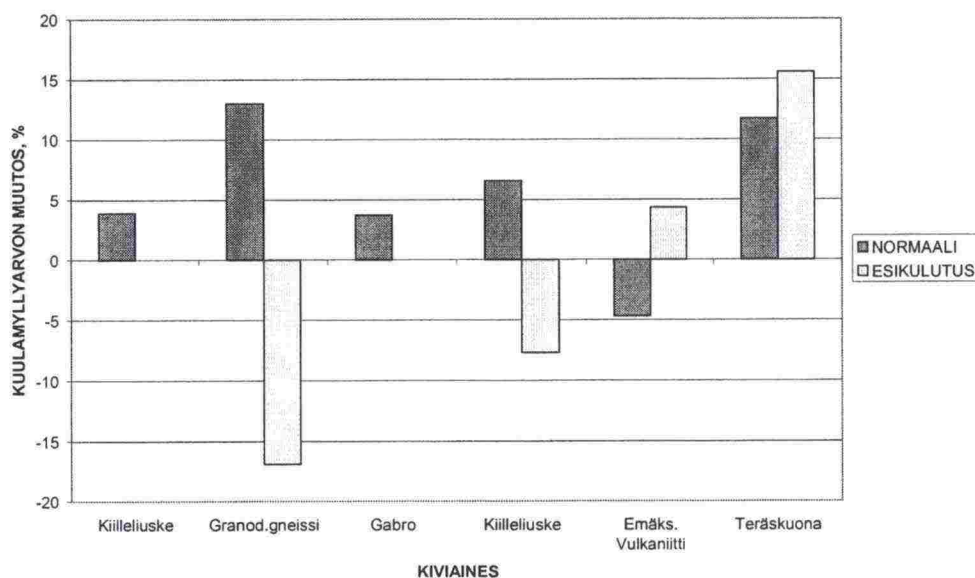
Kuvassa 13 on esitetty kiviainesten kuulamylyarvot normaalilla ja esikulutetulla materiaalilla. Kuvissa 14 ja 15 on esitetty muotoarvon vaikutus kuulamylykokeissa hyvä- ja huonomuotoisten arvojen erotuksena ja muutos prosentteina.



Kuva 13. Normaalit ja esikulutetut kuulamylyarvot erimuotoisilla kiviaineksilla.



Kuva 14. Hyvä- ja huonomuotoisten kiviainesten kuulamylyarvojen erotus normaalilla ja esikulutetulla materiaalilla.

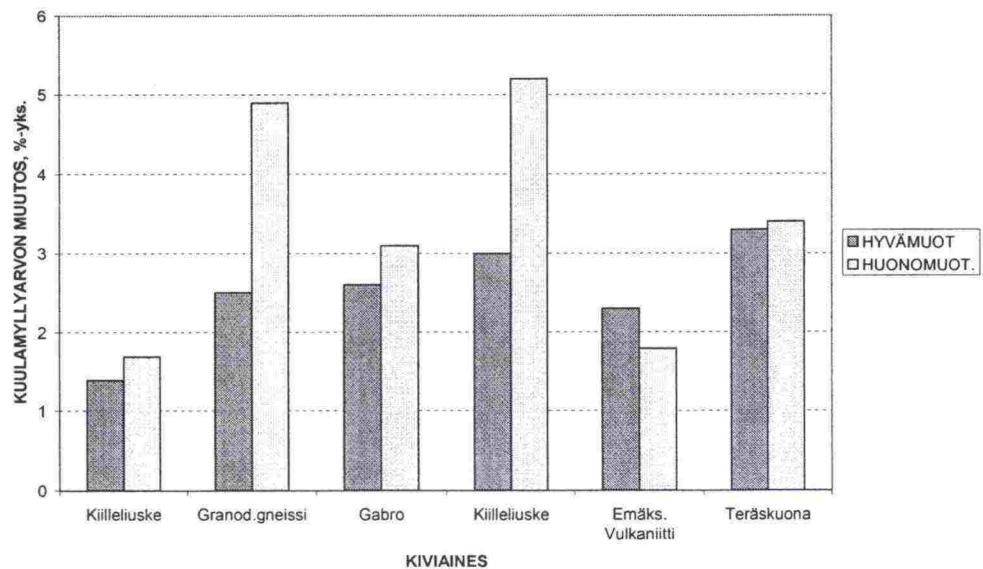


Kuva 15. Hyvä- ja huonomuotoisten kiviainesten kuulamylyarvojen erotus ilmoitettuna muutosprosentteina huonomuotoisen kiviaineksen kuulamylyarvosta laskien.

Tulosten mukaan muotoarvon vaikutus kuulamylykokeessa oli erittäin vähäinen mahdollinen hajonta ja suuri muotoarvoero (15 %-yks.) huomioon ottaen. Hyvämuotoisilla kiviaineksilla kuulamylyarvo oli keskimäärin 0,7 %-yksikköä parempi kuin huonomuotoisilla kiviaineksilla. Vaihteluväli oli -0,3 – +1,4 %-yksikköä. Näytteen 5 pieni negatiivinen arvo johtuu mahdollisesti kiviaineksen ja menetelmän luonnollisesta hajonnasta. Muutos prosentteina ilmaistuna oli keskimäärin 5,7 % vaihteluvälin ollessa -4,7 – +13,0 %.

Esikulutetuilla kiviaineksilla muotoarvolla joko ei ollut vaikutusta tai huonomuotoiset kiviainekset kuluivat vähemmän kuin hyvämuotoiset poislukien teräskuona, jolla ainoana muotoarvon heikkeneminen heikensi myös kuulamylyarvoa samassa suhteessa kuin esikuluttamattomilla kiviaineksilla. Muutos lukuarvoina oli keskimäärin $-0,1$ %-yksikköä ja vaihteluväli oli $-1,0 - +1,2$ %-yksikköä. Muutos prosentteina oli keskimäärin $-0,8$ % vaihteluvälin ollessa $-16,9 - +15,6$ %.

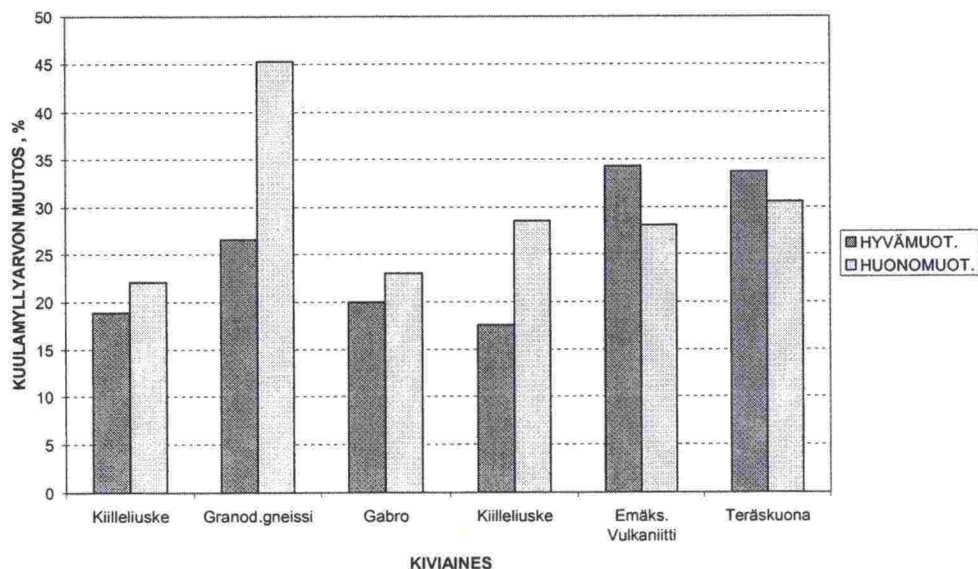
Kuvissa 16 ja 17 on esitetty esikulutuksen vaikutus hyvä- ja huonomuotoisilla kiviaineksilla. Kuvassa 16 on tulokset %-yksikkönä ja kuvassa 17 tulokset ovat prosentteina.



Kuva 16. Esikulutuksen vaikutus kuulamylyarvoihin esikuluttamattoman ja esikulutetun materiaalien kuulamylyarvojen erotuksena.

Esikulutuksen vaikutus hyvä- ja huonomuotoisella kiviaineksella oli saman suuntainen, mutta huonomuotoisella kiviaineksella vaikutus oli jonkin verran suurempi. Hyvämuotoisella kiviaineksella esikulutuksen kuulamylyarvoa parantava vaikutus oli keskimäärin $2,5$ %-yksikköä ja huonomuotoisella kiviaineksella $3,4$ %-yksikköä vaihteluvälien ollessa $1,4 - 3,3$ %-yksikköä ja $1,7 - 5,2$ %-yksikköä.

Prosentteina ilmaistuna hyvämuotoisella kiviaineksella parannus oli keskimäärin $25,2$ % ja huonomuotoisella kiviaineksella $29,6$ %. Vaihteluvälien ollessa $17,6 - 34,3$ % ja $22,1 - 45,3$ %.

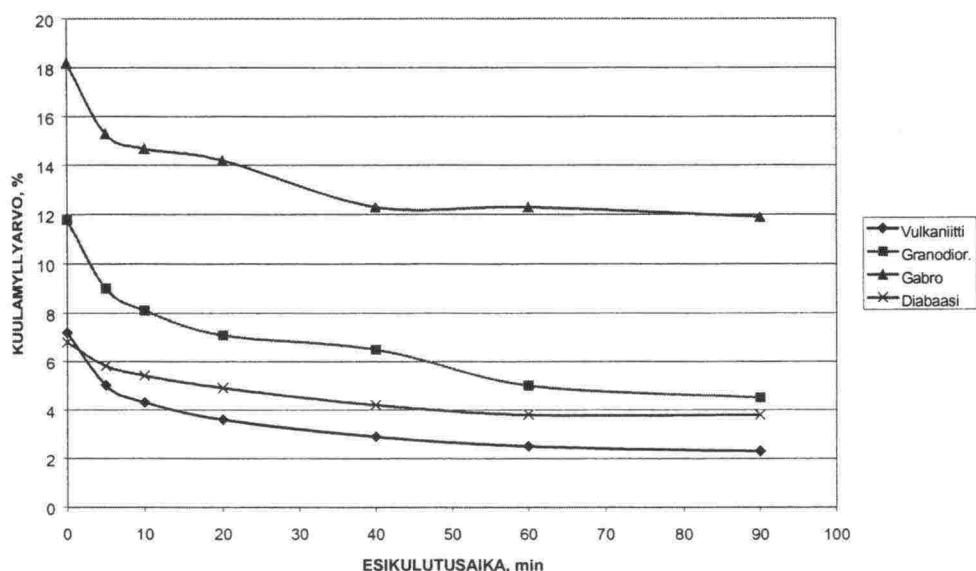


Kuva 17. Esikulutuksen vaikutus kuulamylyarvoihin prosentteina.

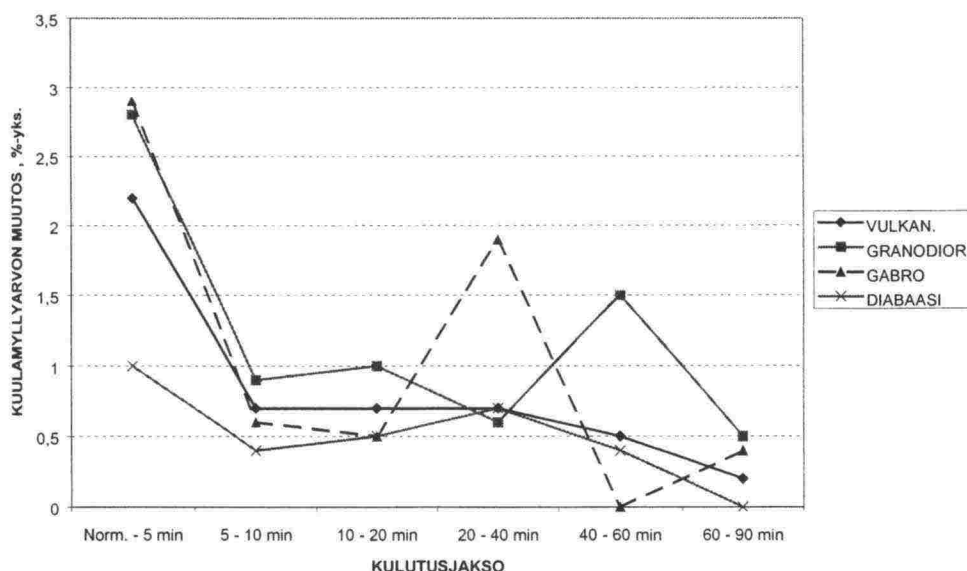
4.2 Laboratoriokokeet

Esikulutuksen vaikutus lujuudeltaan ja mineralogiselta koostumukseltaan erilaisiin kiviaineksiin käy ilmi kuvista 18 – 21. Kuvassa 18 on esitetty eri vaiheissa saadut kuulamylyarvot ja kuvassa 19 on esitetty muutosten suuruus edelliseen tapahtumaan verrattuna. Pienelläkin esikulutuksella oli suuri vaikutus kiviainekseen. Kiviainekset käyttäytyivät lukuarvoina tarkastellen samalla lailla, joskin diabaasin lukuarvo oli muita kiviaineksia alhaisempi. Kuulamylyarvo parani viiden minuutin esikulutuksella vulkaniitilla 2,2 %-yksikköä, granodioriitilla 2,8 %-yksikköä, gabrolla 2,9 %-yksikköä ja diabaasilla 1,0 %-yksikköä. Pitempiaikaisempien esikulutusten vaikutus oli ensimmäistä esikulutusta selvästi vähäisempi suhteellisesti niitä toisiinsa verrattaessa. Hionta-ajan lisääntyessä ja kiviainesten pyörityessä sekä pinnan hioutuessa kuulamylyarvot luonnollisesti pienenevät. Suurimmalla esihionta-ajalla lukuarvon parannus oli edelliseen hionta-aikaan verrattuna välillä 0 – 0,5 %-yksikköä (kuva 19).

Tarkasteltaessa muutoksia prosentuaalisesti käy ilmi kiviainesten erilaiset luonteet. Happamilla kivillä (graniittisilla) pienelläkin esikulutuksella on hyvin voimakas vaikutus rakeiden särmien kulumiseen johtuen juuri mineralogisista tekijöistä. Graniittisilla kivillä olevat päämineraalit ovat kovia, mutta hauraita ja särmien läheisyydessä olevat yksittäiset mineraalit ovat usein rikkonaisia. Emäksisillä, tummilla kivillä merkittävä osa mineraaleista on sitkeitä, mutta pehmeitä, jotka käyttäytyvät murskauksessa ja hioivissa prosesseissa vastakkaisesti kovien mineraalien kanssa.



Kuva 18. Kiviainesten kuulamylyarvot esikulutusten suhteen

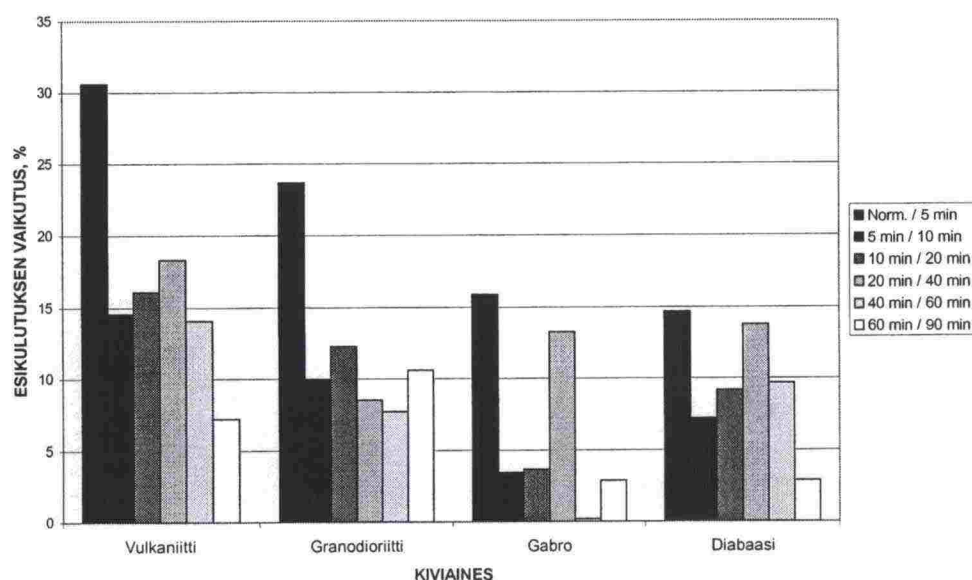


Kuva 19. Kuulamylyarvojen muutos edelliseen tapahtumaan verrattuna

Kuvassa 20 on esitetty esikulutussajan vaikutus prosentteina edelliseen kuulamylyarvoon verrattuna. Happamilla kivilla (vulkaniitti ja granodioriitti) vähäisenkin esikulutus vaikuttaa arvoihin voimakkaasti. Viiden minuutin esikulutus on parantanut kuulamylyarvoja 30,6 ja 23,7 %, kun arvot emäksisillä kiviaineksilla (gabro ja diabaasi) olivat 15,9 ja 14,7 % eli happamilla kivillä pienen esikulutuksen vaikutus oli lähes kaksinkertainen emäksisiin kiviaineksiin verrattuna. Esikulutussajan lisääntyessä voidaan yleistäen sanoa happamien kiviainesten kulumaerojen suhteet pysyneen lähes samalla tasolla ja kuluma-arvojen parantuneen koko ajan. Vulkaniitilla arvot paranivat 10, 20, 40, 60 ja 90 min. esihiontojen jälkeen 14,6, 16,1 ja 18,3 % edelliseen arvoon nähden. Granodioriitillä vastaavat arvot olivat 10,0, 12,3, 8,5,

7,7 ja 10,6 % %. Pisimmällä käytetyllä esihionta-ajalla ei aivan saavutettu kiviaineksen pienintä kuulamylyllyarvoa, mutta arvojen voidaan katsoa lähestyneen sitä esikulutusaikaa, jonka jälkeen lisääntyvä esikulutus ei enää paranna saatavia kuulamylyllyarvoja.

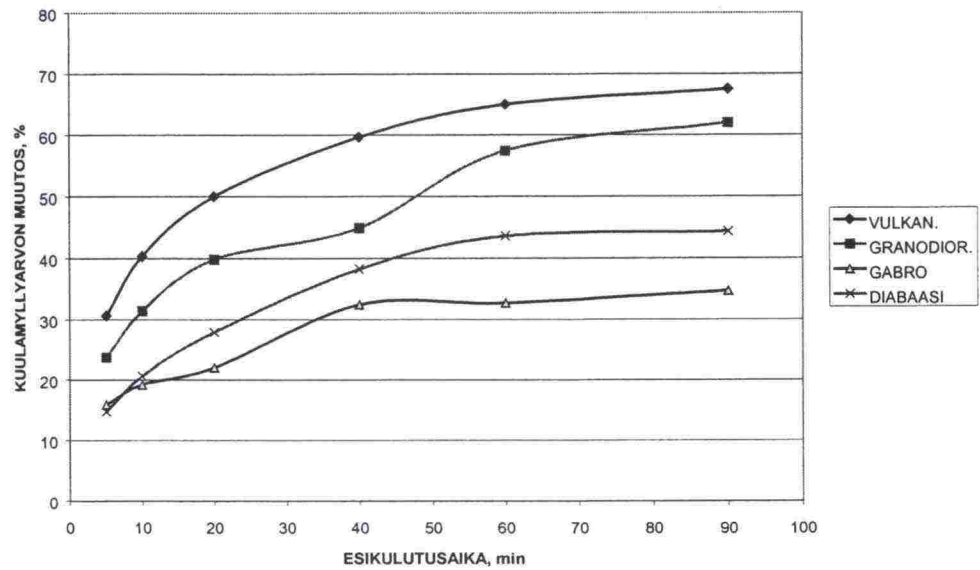
Emäksisistä kiviaineksista gabrolla vastaavat arvot paranivat 3,5, 3,7, 13,3, 0,2 ja 2,9 % edelliseen arvoon nähden sekä diabaasilla 7,2, 9,2, 13,8, 9,7 ja 1,3 %. Prosentuaalisia arvoja tulkittaessa tulee ottaa huomioon mineralogisten seikkojen lisäksi myös kiviainesten lähtölujuudet, jotka luonnollisesti vaikuttavat lukuarvoihin. Pehmeitä mineraaleja sisältävänä emäksiset kiviainekset saavuttavat parhaimman kuulamylyllyarvon vähemmällä esikuluksella kuin happamat kiviainekset. Niillä 40 – 60 minuutin esikulutus oli riittävä, jonka jälkeen kuulamylyllyarvo ei enää parantunut.



Kuva 20. Esikulutusaajan vaikutus kuulamylyllyarvoon edelliseen arvoon verrattuna.

Kuvassa 21 on esitetty esihionta-ajan pituuden vaikutuksen kuulamylyllyarvojen paranemiseen verrattuna käsittelemättömän näytteen kuulamylyllyarvoon. Kuten kuvasta voi päätellä kiviaineksen särmikkyydellä ja pintastruktuurilla olevan suuri vaikutus tuotetestinä tehtävään kuulamylyllytestiin. Kokeessa käytetyn pisimmän esihionta-ajan (90 min) jälkeen tehdyt kuulamylyllyarvot olivat graniittisilla kiviaineksilla 62,0 – 67,5 % ja emäksisillä kiviaineksilla 34,7 – 44,3 % paremmat kuin käsittelemättömästä aineksesta saadut arvot.

Esihionnalla saatua vulkaniitin arvoa 2,3 % voidaan pitää jo poikkeuksellisen hyvänä tuloksena, vaikka käyrän (kuva 21) mukaan parasta arvoa ei vielä ollut edes saavutettu. Myös granodioriitin arvo 4,5 on erinomainen ja vastaa erittäin kulutuskestävän kiviaineksen kuulamylyllyarvoa, vaikka niiden rakenteelliset lujuudet eivät ole verrannolliset keskenään.



Kuva 21. Esihionta-ajan vaikutus kuulamylyarvoon (%)

Kaikilla kiviaineksilla rakeiden särmikkyiden ja pintastruktuurin muutos vaikuttaa kuulamylykokeessa saatavaan arvoon. Eri tavalla tuotettujen kiviainesten vertailtavuus on suhteellisen vaikeaa, vaikka tiedettäisiin murskauskaavio ja murskaimen likimääräinen vaikutus kiviainesrakeeseen.

Toinen tärkeä arvosteluun ja valintaan vaikuttava seikka on saadun kuulamylyarvon parannuksen ja kulutuskestävyyden välinen suhde. Kiviainesrakeen ominaiskulutuskestävyys on mineralogisten ja rakenteellisten seikkojen summa, jossa rakeen särmikkyydellä on vaikutusta lähinnä kulumisen alussa. Kuulamylyarvon parannus ja sen vaikutus päällysteen kulutuskestävyyteen tulee todeta todellisin tiekulumin.

Kiviaineksen muoto ei sinänsä vaikuta kulumiskestävyyteen, jos kiviainesrae on riittävän hyvämuotoinen ja suuri niin, että nastan iskut eivät kykene rikkomaan koko raetta tai lohkomaan jatkuvasti reunoista. Tällöin kulutus kohdistuu mineraalirakeisiin ja niiden kontakteihin. Särmikkyiden, pintastruktuurin ja muodon muutokset eivät vaikuta kiviaineksen kulutuskestävyyden perustana oleviin mineralogiseen koostumukseen ja kiviaineksen rakenteeseen. Niillä on tosin vaikutusta rakeen alkukulumaan ja päällysteen suhteusominaisuuksiin ja sitä kautta myös päällysteen kulutuskestävyyteen.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kiviaineksen käyttökelpoisuutta arvioidaan siitä määritettyjen parametrien perusteella, jotka perustuvat kokeellisilla laboratoriomenetelmillä saataviin arvoihin. Kiviainestestauksessa käyttöön otetut SFS-EN standardit ovat tuotetesteja eli testaus tehdään lopputuotteesta, mikä tietysti sinänsä on käyttäjän kannalta järkevää. Ongelmia syntyy silloin, kun pitää vertailla ja valita tarkoitukseen sopiva kiviaines eri tuotantoprosessien kiviainesten kuulamylyarvojen perusteella.

Kuulamylykokeessa tulokseen vaikuttaa kiviaineksen mineralogisten seikkojen lisäksi kiviaineksen raemuoto, murskaustapa ja loppukäsittely. Hiovana menetelmänä kuulamylykokeesta saatava tulos on suuresti riippuvainen lujuustekijöiden lisäksi kiviainesrakeiden särmikkyydestä ja pintastruktuurista sekä rikkonaisuudesta.

Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena oli selvittää kiviaineksen särmikkyyden ja pintastruktuurin vaikutusta kuulamylyarvoihin ja tutkia voidaanko kuulamylyarvon perusteella luotettavasti ennustaa kiviaineksen kulutuskestävyys tuotantotavasta riippumatta.

Tutkimuksen kirjallisuusosan ja laboratoriokokeiden tulosten perusteella voidaan vetää seuraavia johtopäätöksiä:

1. Kuulamylytesti SFS-EN 1097-9 on hiovasta luonteestaan johtuen erittäin herkkä ennen kaikkea kiviaineksen särmikkyyden mutta myös pintastruktuurin muutoksille.
2. Eri tavalla tuotettujen kiviainesten kuulamylyarvojen vertailtavuus on hankalaa, koska kiviaineksen "käsittelyllä" saatua kuulamylyarvon parannusta ei voida sitoa tarkasti mihinkään kiviainesominaisuuteen, vaan saatu parannus on mitä suurimmassa määrin kiviainekohtainen ja sen ominaisuuksien summa.
3. Täysmittakaavaisella kubisoinnilla tai laboratoriossa tehdyllä esihionnalla Asfalttinormien lujuuden mukainen kiviainesluokka parani noin 70 %:lla kiviaineksista. Suurimmalla osalla parannus oli yksi luokka ja noin 15 %:lla muutos oli kaksi luokkaa. Kahden luokan muutos tapahtui suurimmalla osalla luokasta III luokkaan I.
4. Lujuuden vaikutus esihionnalla saatuihin kuulamylyarvon parannuksiin oli tietysti hieman riippuvainen lujuusluokasta siten, että prosenttiyksiköissä tapahtuvan muutoksen vaihteluväli kasvaa lujuuden heiketessä, mutta vastaavasti prosentteina tapahtuneet muutokset ovat lähes samat lujuusluokasta riippumatta. Kuitenkin muutoksen ennustettavuus on huono, koska tapahtuneen muutoksen vaihteluvälin suuruus oli 10 – 45 % ja lukuarvoina ilmaistuna 1,5 – 6,5 %-yksikköä.

5. Muotoarvon (litteyden) ja esihionnalla saatujen kuulamylyarvon parannuksien välillä voidaan sanoa olevan yhteys siten, että parempimuotoisilla kiviaineksilla tapahtunut muutosalue %-yksikköinä ja prosentteina on kapeampi ja alhaisempi kuin huonompimuotoisilla, mikä oli oletettavaakin. Hyvämuotoisella kiviaineksilla (litteys 5 %) esihionnalla saatu kuulamylyarvon parannus oli keskimäärin noin 25 % vaihteluvälin olessa noin 17 – 34 % ja huonomuotoisella kiviaineksella (litteys 20 %) vastaavat arvot olivat noin 30 % ja 22 – 45 %.
6. Käsitlemättömän kiviaineksen muodon (litteys 5 ja 20 %) vaikutus itse kuulamylykokeen arvoihin oli erittäin vähäinen suuren muoarvoeron huomioiden tai sitä ei ollut. Tapahtuneet lujuusmuutokset olivat niin vähäiset, että ne ovat voineet johtua pelkästään normaalista hajonnasta.
7. Myöskään esikulutetuilla kiviaineksilla muotoarvolla ei ollut juurikaan merkitystä kokeen tuloksiin. Hyvä- ja huonomuotoisilla kiviaineksilla saadut arvot olivat samat tai huonomuotoisilla kiviaineksilla jopa hieman paremmat, mutta erot olivat niin vähäiset, että ilman runsaita toistoja ei voida sanoa muotoarvon vaikutuksesta tarkempaa.
8. Esikulutuksen vaikutus on aivan alussa voimakkainta kaikilla kiviainestyypeillä, mutta happamilla kivillä (graniittiset kivet) prosentuaalisesti lasien vaikutus on lähes kaksinkertainen emäksisiin (tummat kivet) kiviaineksiin verrattuna.
9. Pisimmän esikulutuksen (90 min) jälkeen tehdyt kuulamylyarvot olivat graniittisella kiviaineksella 62 – 68 % paremmat ja emäksisillä kiviaineksilla 35 – 44 % paremmat kuin käsitlemättömän kiviaineksen arvot.
10. Kaikkien kiviainesten rakeiden särmikkyyden ja pintastruktuurin muutokset vaikuttavat kuulamylykokeessa saataviin lujuusarvoihin, joita käytetään valintaperusteina kiviainesvalinnassa. Kokeessa tapahtuneiden muutosten suhdetta todelliseen kulutuskestävyyden muutokseen ei tunneta tällä hetkellä riittävästi, jotta eri tavalla tuotettujen kiviainesten kuulamylyarvojen perusteella voitaisiin tehdä aina oikea valinta pitkäaikaisen kulutuskestävyyden kannalta.

Ympäristö/vaikutukset

TIEL 3200555	Ohikulkutie ja taajama (TS 9/1999)
TIEL 3200558	Niittykasvillisuuden perustaminen tieluiskiin - Koetuloksia ja kirjallisuusselvitys (TS 12/1999)
TIEL 3200560	Saneerattujen taajamien viherympäristö, kivetyn pinnat, kalusteet - Kuntotarkastelu (TS 15/1999)
TIEL 4000205	Tierummut vaellusesteinä - Ongelman kuvaus ja ratkaisumalleja (SJ 22/1999)
TIEL 4000206	Suomen tieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset - Vuoden 1996 selvityksen päivitys (SJ 23/1999)
TIEL 4000215	Tieliikenne-ennuste vuosille 1997-2030. Vuoden 1995 ennusteen päivitys (SJ 35/1999)
TIEL 4000216	Tieliikenteen ajokustannukset: Onnettomuuskustannukset Suomessa ja Ruotsissa (SJ 36/1999)
TIEL 4000217	Tieliikenteen ajokustannukset: Ajoneuvokustannukset (SJ 37/1999)
TIEL 4000216	Tieliikenteen ajokustannukset: Aikakustannukset (SJ 36/1999)

Tietekniikka

TIEL 3200531	Liikennemerkkien tukien taipumaluokat prEN 12899-1 mukaan. Yleistä projektista - Tyyppisarjojen tukien rakennesuunnittelun tarkistus - Uudet taipumaluokat (TS 39/1998)
TIEL 3200537	Geotekniikan informaatiojulkaisuja: Siltojen pohjatutkimukset (TS 1/1999)
TIEL 3200539	Tiepenkereiden vetolujitteiden toiminta käyttötilassa (TS 47/1998)
Syvästabilointi Tielaitoksen kohteissa:	
TIEL 3200540	Osa 1: Toteutetut kohteet (TS 2/1999)
TIEL 3200541	Osa 2: Laadunvalvontatutkimukset ja laadunalitusten vaikutus (TS 3/1999)
TIEL 3200553	Uusiopäällystetutkimukset (TS 7/1999)
TIEL 3200557	Loivaluiskaisten teiden kuivatus (TS 11/1999)
TIEL 3200571	Asfalttinormien kiviainesten hienoainesseoksen laatuvaatimukset (TS 26/1999)
TIEL 3200575	Kuulamyly- ja Micro-Deval -kokeiden tulosten vastaavuus (TS 30/1999)
TIEL 3200578	Halvat kevyen liikenteen väylät (TS 35/1999)
TIEL 3200579	Kiviaineksen pintakarkeuden vaikutus kuulamylyarvoon (TS 36/1999)
TIEL 3200580	Kiviaineksen välilajitteen raemuodon vaikutus päällysteen ominaisuuksiin (TS 37/1999)
TIEL 3200591	Kasvipeitteisen meluesteen kokeilu (TS 2/2000)
TIEL 4000199	Selvitys tien häikäisy-suojista (SJ 5/1999)
TIEL 4000200	Kelirikkoisen soratien kantavuuden parantamismenetelmiä. Bitumistabilointi ja raudoitettu murske. Loppuraportti. (SJ 6/1999)
TIEL 4000201	Teiden talvihoidon yhteiskunnalliset vaikutukset. Yhteenvedo tehdyistä selvityksistä. (SJ 9/1999)
TIEL 4000202	Tutkimus- ja kehittämistoiminnan vuosiraportti 1998 (SJ 10/1999)
TIEL 4000209	Kevyen liikenteen kaatumistapaturmien selvittäminen sairauskertomusten perusteella - Jyväskylä (SJ 26/1999)
TIEL 4000210	Laatuvaatimusten asettaminen, kun urakka sisältää suunnittelun ja rakentamisen (SJ 27/1999)
TIEL 4000222	Tunnin pilotti. Hoidon toteutuminen, II väliraportti syyskuu 1999 (SJ 41/1999)
TIEL 4000228	Masuunikuonatuotteiden E-moduulit (SJ 49/1999)
TIEL 4000229	Analyttisessä mitoituksessa käytettävät asfalttipäällysteen jäykkyydet ja väsymismallit (SJ 50/1999)
TIEL 4000232	Tunnin pilotti - Vaikutus liikenneturvallisuuteen (SJ 54/1999)

OHJEET JALAATUVAATIMUKSET

TIEL 2110014	Läjitysalueen suunnittelu - Läjitysalueohje
TIEL 2140015	Rakenteen parantamista edeltävät tutkimukset
TIEL 2140016	Puun käyttö melusteissa
TIEL 2150008	Luonnon monimuotoisuus ja tienpito - Tieluonnon hoito-ohjelma
TIEL 2150009	Tiehankkeiden ja tienpidon toimien ympäristövaikutusten selvittäminen
TIEL 2210013	TYLT: Tiekaiteet
TIEL 2212456-2000	TYLT: Perustamis- ja vahvistamistyöt
TIEL 2212802-2000	TYLT: Päälystystyöt
TIEL 2212809-98	TYLT: Murskaustyöt
TIEL 2230054	Kevyen liikenteen väylien hoito; menetelmätieto
TIEL 2240002-98	Yleiset arvomuutosperusteet: Murskaustyöt
TIEL 2243560-2000	Yleiset arvomuutosperusteet: Päälystystyöt

SELVITYKSIÄ (=TS) JA SISÄISIÄ JULKAISUJA (=SJ):

Liikennetekniikka

TIEL 3200561	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Ohitusnäkemät (TS 16/1999)
TIEL 3200570E	S 12 Improvement solutions for main roads: New road types - Summary on test roads in Finland (TS 25/1999)
TIEL 4000191	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Uudet tietyypit - Koeteiden turvallisuus (SJ 20/1999)
TIEL 4000193	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Uudet tietyypit - Selvitys ulkomaisista kokemuksista (SJ 21/1999)
TIEL 4000212	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Parannettavien pääteiden suuntaus (SJ 30/1999)
TIEL 4000213	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Uusien tietyypivaihtoehtojen vertailu - Vt 6 välillä Koskenkylä - Kouvola Osa A: Raportti, Osa B: Liitekartat (SJ 31/1999)
TIEL 4000214	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Kevyen liikenteen ja yksityistieliittymien yhteiset ratkaisut (SJ 33/1999)
TIEL 4000221	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Tutkimussuunnitelma (SJ 42/1999)
TIEL 4000227	S 12 Pääteiden parantamisratkaisut: Kapeiden pientareiden vaikutus kaksiajorataisten teiden turvallisuuteen (SJ 47/1999)